

NANOCIMENTO DE REJEITO EM SUBSTITUIÇÃO A CIMENTO CONVENCIONALFernanda Letícia Duarte Pereira¹ (IC), Viviany Geraldo de Moraes (PQ)¹¹Universidade Federal de Itajubá-Campus Itabira.**Palavras-chave:** Crescimento *in situ*. Nanomateriais na construção. Nanotubos de carbono. Sustentabilidade.**Introdução**

A indústria cimenteira é uma das principais fontes de emissão de dióxido de carbono (CO₂) no setor industrial global. A produção de cimento Portland é responsável por cerca de 7% a 8% das emissões globais desse gás de efeito estufa, devido principalmente à calcinação do calcário e ao elevado consumo energético necessário para a clínquerização (Amjad *et al.*, 2025).

Com o crescimento acelerado da construção civil, principalmente em países em desenvolvimento, há uma expectativa de aumento da demanda por cimento nas próximas décadas (Amjad *et al.*, 2025). Esse cenário agrava ainda mais os impactos ambientais, reforçando a urgência de estratégias que visem mitigar as emissões sem comprometer o desempenho estrutural dos materiais utilizados.

Nesse cenário, criar opções sustentáveis ao cimento convencional se faz de suma importância quando nos referimos ao âmbito científico e industrial. Uma das soluções mais favoráveis para reduzir as emissões de carbono no setor é a substituição parcial do clínquer por materiais de menor pegada de carbono (Zerbini *et al.*, 2023).

A crescente geração de rejeitos industriais e de mineração representa um desafio ambiental, mas também uma oportunidade estratégica para a construção civil. No caso dos rejeitos de minério de ferro (do inglês “iron ore tailings”- IOT), sua grande disponibilidade, principalmente no Brasil, associada à composição rica em óxidos de silício e alumínio, confere a esses resíduos um potencial significativo de reatividade pozolânica (Almada *et al.*, 2022; Zerbini *et al.*, 2023).

Contudo, apesar do potencial, a aplicação direta dos rejeitos de minério pode apresentar desafios. A reatividade pozolânica do material em seu estado natural é muitas vezes limitada, o que pode exigir elevados teores de substituição para se obter um efeito significativo, impactando o desenvolvimento da

resistência do compósito, especialmente nas primeiras idades.

A aplicação desses rejeitos como adição ao cimento pode reduzir consideravelmente o uso de clínquer, resultando em ganhos ambientais e econômicos. Estudos recentes indicam que é possível manter — e em alguns casos melhorar — propriedades como resistência à compressão e durabilidade mesmo com substituições parciais do cimento por resíduos adequadamente processados (Almada *et al.*, 2022; Furlani *et al.*, 2024).

Adicionalmente, a nanotecnologia, por meio da aplicação de Nanotubos de Carbono (NTC), apresenta-se como uma abordagem estratégica e inovadora para a construção civil. O denominado “nanocimento” consiste em NTC crescidos *in situ* sobre grãos de cimento, a partir de pré-catalisadores desenvolvidos no IOT. Esse processo resulta na formação do nanocimento de rejeito (NanoCIM), empregado como substituição parcial do cimento convencional na preparação de corpos de prova de argamassa destinados a ensaios de propriedades mecânicas. Ademais, considera-se a estimativa da redução das emissões de CO₂ por meio do índice de performance ambiental, conforme previsto na literatura, tomando como referência a relação entre a resistência mecânica à compressão e a massa de cimento utilizada no traço (Carvalho *et al.*, 2025).

Dessa forma, a pesquisa proposta é justificada pela combinação entre a necessidade por soluções de baixo carbono, a grande quantidade de resíduos desperdiçados e o potencial inovador que a nanotecnologia oferece para a sua valorização, transformando um passivo ambiental em um material cimentício de alto desempenho.

Metodologia

O catalisador utilizado para a produção do compósito cimentício foi sintetizado a partir da mistura do cloreto de ferro hexahidratado (FeCl₃·6H₂O) e nitrato de cobalto

“Do conhecimento acadêmico à transformação sustentável: inovação com validação científica”

hexahidratado ($\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), suportados em óxido de magnésio (MgO). A proporção mássica de Fe:Co:MgO foi definida em 1:1:½, respectivamente.

Para a síntese, os sais metálicos foram completamente solubilizados em 20 mL de álcool etílico sob agitação. A solução resultante foi então submetida a um processo de calcinação em forno mufla, operando a uma temperatura de 550 °C por um período de 3 horas. Este tratamento térmico tem como objetivo a remoção de compostos voláteis e a conversão dos sais em seus respectivos óxidos metálicos, formando o catalisador em pó Fe:Co:MgO.

Seguindo a metodologia descrita por Costal et al. (2023), o catalisador Fe:Co:MgO foi impregnado em rejeito de minério de ferro (IOT), originando o denominado pré-catalisador de rejeito. A utilização de um pré-catalisador é fundamental na síntese de NTC sobre grãos de cimento, uma vez que a elevada reatividade química do cimento em relação aos metais compromete a estabilidade do catalisador. Dessa forma, a aplicação do pré-catalisador sobre um macromaterial, neste caso o rejeito de minério de ferro — embora também possam ser empregados outros materiais, como areia e/ou argila, conforme reportado em estudos anteriores (Carvalho *et al.*, 2025) — mostra-se essencial para viabilizar a síntese efetiva de NTC *in situ* no cimento.

Sendo assim, para a síntese do compósito final de NanoCIM, o pré-catalisador de rejeito foi homogeneizado em um gral com cimento Portland em uma proporção mássica de 1:2 (pré-catalisador:cimento). A mistura foi então transferida para um forno mufla e submetida a um segundo tratamento térmico a 550 °C por 2 horas, conforme procedimento detalhado por (Carvalho *et al.*, 2025). Durante esta etapa, ocorre o crescimento *in situ* de nanotubos de carbono (NTC) sobre as partículas de cimento pelo método de deposição química de vapor (do inglês – CVD: “Chemical Vapour Deposition”) no qual os compostos de carbono presentes são utilizados como fonte para a formação dos NTCs. O material resultante deste processo é o compósito cimentício modificado, aqui denominado NanoCIM.

As argamassas foram preparadas utilizando o NanoCIM como substituto parcial ao cimento Portland convencional (10 % da massa). A incorporação do NanoCIM foi realizada diretamente na mistura, sem a

necessidade de utilizar agentes dispersantes externos ou aditivos químicos, seguindo a Tabela 1 para os traços usados para a três amostras analisadas, onde REF (referência padrão, usando a massa total de cimento no traço), REF-10 (referência usando 10% a menos de massa de cimento) e NanoCIM (usando 10% a menos da massa de cimento e retirado ainda 1 grama de cimento, para manter a proporcionalidade da referência (REF-10) foi adicionado 1 grama de Nanocimento de rejeito). As massas descritas na Tabela 1, resultam em três corpos de provas prismáticos (160 mm × 40 mm × 40 mm) por masseira. Em todas as amostras foram produzidas usando areias normatizadas (meshes 16 (1,2 mm), 30(0,6 mm), 50 (0,3 mm) e 100 (0,15mm) na proporção de 1:3 de cimento- areia, e razão água/cimento constante de 0,48.

Após a definição dos traços, os materiais foram misturados e homogeneizados para a moldagem dos corpos de prova, que posteriormente foram submetidos aos ensaios de caracterização mecânica, usando uma máquina de teste universal (EMIC–DL 20000) para investigar tração na flexão e compressão, segundo a NBR 13279 (ABNT -2005), além da análise do impacto ambiental (redução de CO₂), conforme estimativa já usada na literatura (Carvalho *et al.*, 2025).

Tabela 1: Traços usados na preparação de amostras de argamassas.

AMOSTRAS	REF	REF-10	NanoCIM
Cimento Portland(g)	395,0	355,5	354,5
Areia 16 mesh (g)	296,0	296,0	296,0
Areia 30 mesh (g)	296,0	296,0	296,0
Areia 50 mesh (g)	296,0	296,0	296,0
Areia 100 mesh (g)	296,0	296,0	296,0
NanoCIM (g)	-	-	1,0
Água (ml)	190,0	171,0	171,0

Fonte: dados dos autores (2025).

Resultados e discussão

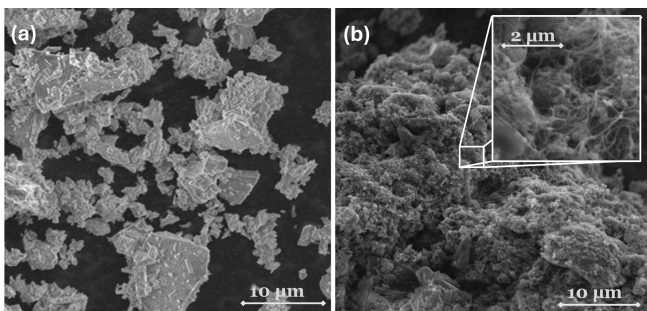
A Figura 1 apresenta as micrografias obtidas por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), comparando a amostra de cimento Portland puro (Figura 1a) com o compósito NanoCIM (Figura 1b). As imagens confirmam o sucesso da síntese *in situ* dos nanotubos de carbono (NTCs) diretamente sobre a superfície dos grãos de cimento. Observa-se a formação de uma rede

“Do conhecimento acadêmico à transformação sustentável: inovação com validação científica”

entrelaçada de NTCs, que recobre as partículas do cimento.

Este crescimento direto é vantajoso por promover uma excelente aderência e dispersão dos nanotubos na matriz, um desafio comum em compósitos cimentícios (Li; Zhang; Wang, 2022). Acredita-se que essa rede de NTCs atue como pontes de transferência de carga e como sítios de nucleação para os produtos de hidratação do cimento, como o C-S-H, refinando a microestrutura e reduzindo a porosidade do compósito.

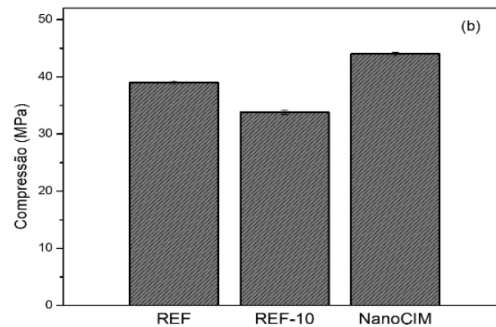
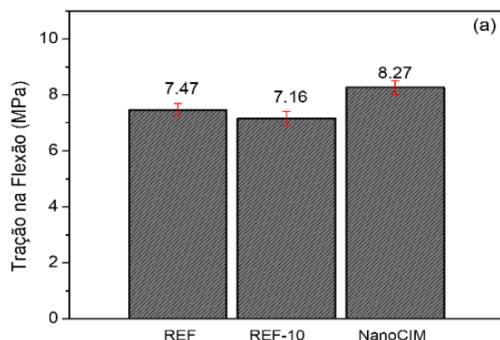
Figura 1: Imagens SEM em cimento Portland (a) e IOTNC (b).



Fonte: dados dos autores (2025).

Os resultados dos ensaios de resistência mecânica são exibidos na Figura 2. A análise da resistência à tração na flexão (Figura 2a) e da resistência à compressão (Figura 2b) revela um ganho de desempenho notável para o traço contendo NanoCIM em comparação com a amostra de referência (REF-L10). Foram observados incrementos de aproximadamente 15% na resistência à flexão e 30% na resistência à compressão.

Figura 2: Resistência à tração na flexão (a) e à compressão (b) para amostras de argamassas analisadas.

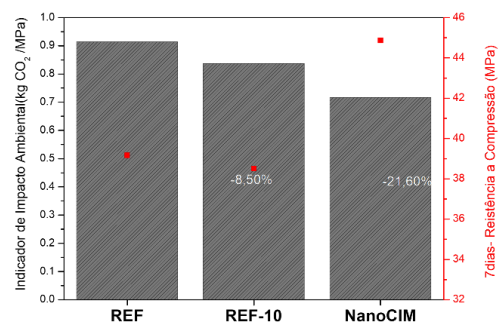


Fonte: dados dos autores (2025).

Este aumento nas propriedades mecânicas pode ser atribuído a dois mecanismos principais, conforme visto na literatura. Primeiro, o efeito de ponte dos NTCs, que transpõem microfissuras na matriz cimentícia, dificultando sua propagação e aumentando a tenacidade do material. Segundo o efeito de preenchimento, onde os NTCs ocupam os poros da matriz, resultando em uma microestrutura mais densa e resistente (Liew *et al.*, 2016; Zerbini *et al.*, 2023). A melhoria no desempenho é um forte indicativo de que a incorporação do NanoCIM foi eficiente na otimização das propriedades mecânicas.

Além do ganho mecânico, foi avaliado o impacto ambiental do compósito por meio de um indicador de emissão de CO₂ por unidade de resistência (kgCO₂/m³/MPa), conforme proposto por (Furlani *et al.*, 2024) e usado em trabalhos anteriores (Carvalho *et al.*, 2025) e mostrado na Figura 3. O gráfico da Figura 3 demonstra que a amostra com NanoCIM apresentou uma redução de aproximadamente 21,6% no indicador de impacto ambiental em comparação com a mistura de referência (REF).

Figura 3: Indicador de Impacto Ambiental para as amostras de argamassas analisadas



Fonte: dados dos autores (2025).

“Do conhecimento acadêmico à transformação sustentável: inovação com validação científica”

Esta redução é extremamente significativa, pois evidencia que a tecnologia não apenas melhora o desempenho estrutural mecânico, mas também contribui para a sustentabilidade. A capacidade de atingir uma maior resistência com uma menor quantidade de cimento (ou com a valorização de um rejeito) leva a um material com uma menor "pegada de carbono", alinhando-se diretamente com a necessidade de desenvolver materiais de construção mais ecológicos (Amjad *et al.*, 2025).

Conclusões

Os resultados obtidos neste estudo confirmam que a metodologia de crescimento *in situ* de nanotubos de carbono (NTCs) em grãos de cimento demonstrou ser eficaz, promovendo uma dispersão homogênea e uma forte aderência entre os nanotubos as partículas cimentícias. Essa estrutura microestrutural contribuiu diretamente para a melhoria das propriedades físico-mecânicas da argamassa, como resistência à compressão e à flexão, bem como à redução da porosidade e ao aumento da densidade do compósito cimentício.

O presente trabalho pode ser compreendido como uma etapa inicial da investigação ambiental, prevendo-se, em estudos futuros, a avaliação de outras proporções de cimento convencional que poderá ser substituída em uma amostra padrão (20% ou 30%) pelo NanoCIM. Tal substituição parcial do cimento tradicional busca assegurar, senão o incremento, ao menos a manutenção das propriedades mecânicas do compósito, ao mesmo tempo em que representa uma contribuição significativa para a mitigação do impacto ambiental.

Além dos benefícios técnicos e ambientais, o processo investigado neste trabalho atende aos princípios da economia circular, possibilitando a valorização de resíduos industriais e a redução da pegada de carbono na cadeia produtiva do cimento. O aproveitamento de passivos ambientais como os rejeitos de minério de ferro (IOT), junto à nanotecnologia, representa uma estratégia viável para o desenvolvimento de materiais cimentícios mais sustentáveis, com contribuição para redução do efeito estufa e emissão de CO₂.

Agradecimentos

Meus agradecimentos à Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI) - campus Itabira -, por disponibilizar seus laboratórios e por proporcionar um ambiente acadêmico que impulse à pesquisa e à inovação, à Profa. Dra. Viviany Geraldo de Moraes, pelo convite para fazer parte deste projeto, e ao seu grupo de pesquisa por todo o conhecimento compartilhado. Estendemos os agradecimentos às agências de fomento, o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), pelo apoio financeiro para o desenvolvimento deste projeto.

Referências

ABNT (2005) Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. **NBR 13279**

ALMADA, Bruna Silva et al. Study of mechanical, durability and microstructural properties of cementitious composite with addition of different iron ore tailings from Brazil. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 18, p. 1947-1962, 2022.

AMJAD, Hassan et al. A critical review of iron ore tailings as cement and aggregate substitutes for robust infrastructure: Mechanical, durability, eco-economic, and social impacts. **Journal of Cleaner Production**, v. 492, p. 144853, 2025.

CARVALHO, J. do C. L. et al. Synthesis of carbon nanotube-based nanocement: Application in biocompatible mortar with reduced environmental impact. **Carbon**, v. 234, p. 119932, 2025.

COSTA, Glauber Zerbini et al. CNT grown in situ from iron ore tailings: simple dispersion and environmental sustainability. **Journal of Nanoparticle Research**, v. 25, n. 10, 2023.

FURLANI, E. et al. Waste silica sand as a possible pozzolanic filler to produce cement mortars: experimental investigation. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, 2024.

LIEW KM, et al. Carbon nanotube reinforced cementitious composites: an overview. **ComposPart A Appl Sci Manuf**, v. 91, p.301–323, 2016.